

激光诱发热应力成形的研究*

刘顺洪 周龙早 万鹏腾

(华中科技大学材料科学与工程学院, 武汉, 430074)

摘要: 研究了低碳钢板料的激光诱发热应力成形行为。结果表明, 对于多道扫描激光成形工艺, 诱发热应力成形角度受到许多工艺参数的影响, 线能量是激光诱发热应力成形的主要影响因素。其中, 激光功率、光束直径、扫描速度、扫描次数、板料厚度等参数的效应尤其显著。通过对试验结果的定性分析, 所得的结论可以为激光诱发热应力成形技术的进一步理论研究和可能的工业应用提供依据。

关键词: 激光成形 热应力 实验研究

Investigation on laser induced thermal stress bending

Liu Shunhong, Zhou Longzao, Wan Pengteng

(School of Materials Science & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: In the paper, the bending behavior of low carbon steel sheets is studied after being irradiated by an axial CO₂ laser beam. The results show that the final bending angle of the sheets in a multiple-irradiation laser bending process is related to many process parameters, especially laser power, beam diameter, path feed rate, number of irradiation and sheet thickness. Through qualitative analysis of the experimental results, the conclusion obtained may provide basis for theoretical investigation and possible industrial application of laser bending process in the future.

Key words: laser bending thermal stress experimental investigation

引 言

激光诱发热应力成形是一种柔性成形新技术——利用热应力代替外力实现金属板料的成形技术^[1]。图 1 所示为激光诱发热应力成形的基本原理示意图, 有一定离焦量 Z_f 的激光束照射在金属板料上, 并以相对速度 v 扫过板料上表面; 从而在板料厚度方向上形成强烈的温度梯

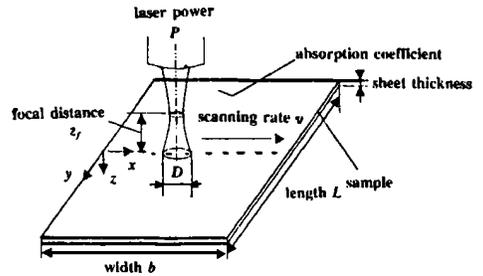


Fig. 1 Principle of laser bending process

度, 诱发出热应力使板料产生永久性塑性变形。激光诱发热应力成形起源于火焰诱发热应力成形。由于激光光源的能量易精确控制, 使得激光诱发热应力成形可不受加工环境、工件几何形状的限制, 通过优化工艺参数、精确控制加热区域的大小和位置, 从而实现对诱发热应力成形的精确控制^[2]。激光诱发热应力成形工艺的这些特点, 使其具有广阔的应用前景。因此, 激光诱发热应力成形技术获得了国际上的关注, 众多的研究领域蓬勃地开展起来。过去 10 多年以来, 激光诱发热应力成形技术的基础研究获得了相当的进展。已经阐明了激光诱发热应力成形的机理。关于激光诱发热应力成形工艺对材料性能的影响也获得了进展。但是, 一些

* 华中科技大学研究生基金资助。

主要的问题还亟待解决^[3]: 例如, 工件的几何形状对成形规律的影响; 材料的显微组织和机械性能的变化; 材料吸收激光的行为; 三维激光诱发热应力成形的自动化问题等。为此, 我们采用 2kW 轴向快流 CO₂ 激光器, 对工程上常用的低碳钢板料进行系统的试验研究, 并且得出了定性的分析结果。

1 试验装置与方法

如图 2 所示, 试验装置由激光器、工作台及夹持装置、位移传感器、热电偶、动态电阻应变仪和 $x-y$ 函数记录仪构成。

试验过程中, 板料一端由特制的夹持装置固定, 激光器用美国 PRC 制造的轴向快流激光器, 最大功率为 2kW。激光功率由控制

单元连续可调, 工作台相对于激光束移动, 实现扫描, 移动速度连续可调。激光束直径通过调整离焦量 Z 而调节(如图 1 所示)。激光诱发热应力成形过程中, 为连续记录板料的变形位移, 设计了变形位移的测量单元, 包括线性夹式位移传感器(自制), 动态电阻应变仪和 $x-y$ 函数记录仪。线性夹式位移传感器夹在用螺栓固定在待弯板料激光扫描路径两侧的刚性杆上。板料的变形位移经传感器测量后输入动态电阻应变仪转为电量输出, 最后经 $x-y$ 函数记录仪连续记录。温度测量单元由热电偶和 $x-y$ 函数记录仪构成。在板料上、下表面距扫描路径相同距离处焊接热电偶, 测量值输入 $x-y$ 函数记录仪连续记录。为保证每次扫描开始时板料的温度一致, 每次扫描后板料用水快速冷却至室温。板料表面涂覆吸光剂, 增大对激光的吸收率。

2 试验结果

2.1 激光诱发热应力成形的温度循环和弯曲角关系曲线

图 3 为板料单道扫描激光诱发热应力成形的试验结果曲线。试验参数: 试样尺寸为 180mm × 180mm × 2mm; 激光扫描速度 $v = 27\text{mm/s}$; 激光功率 $P = 1000\text{W}$; 光束直径 $D = 4\text{mm}$ 。其中, 曲线 a 是平板(原始板料)的弯曲变形曲线, 根据图示可知: 在开始的加热阶段板料有一反向弯曲(背离光源), 这是由于板料热膨胀所引起的(曲线 a)。随后, 在冷却阶段板料开始弯向光源, 并且在一小段线性区内, 变形位移快速线性增大。在随后的时间内变形位移略微减小之后基本保持不变。曲线 b 和 c 分别为板料上下表面的温度循环曲线。可见, 加热大约 2s 上表面达到峰值温度, 随着加热的不断进行, 上下表面间的温差越来越大(曲线 d)。冷却过程中, 上表面温度急剧下降, 而下表面的温度继续升高一段时间后, 才开始降低。之后, 板料上下表面温度趋于一致。

2.2 激光功率和扫描次数与诱发热应力成形角的关系

图 4 为诱发热应力成形角度随激光功率和扫描次数变化的曲线。据图可知, 对于同样的

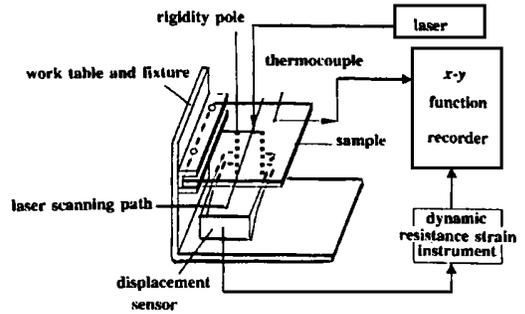


Fig. 2 Experimental setup

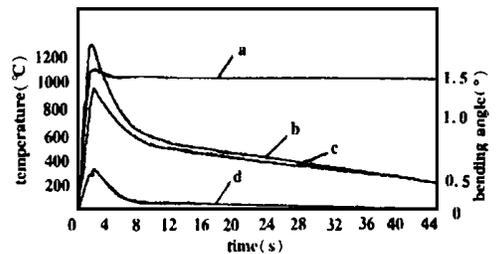


Fig. 3 Temporal variation of the temperature and deformation displacement during the single scanning process

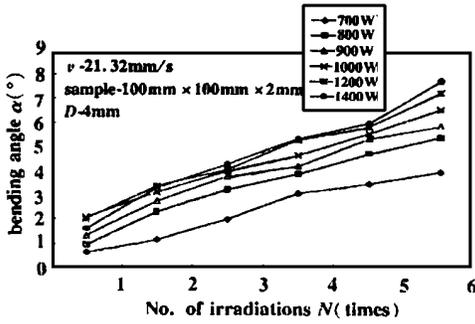


Fig. 4 Effect of laser power and No. of irradiations on the bending angle of thick plate

激光功率,随着扫描次数的增加,诱发热应力成

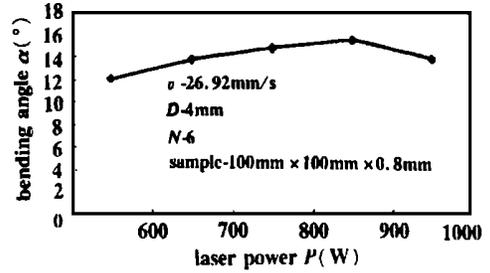


Fig. 5 Effect of laser power on the bending angle of thin plate

形角度呈近似线性增大。并且,当激光功率增大时, α/N 曲线的斜率增大。由此说明,随着激光功率的增大,诱发热应力成形角度增大。

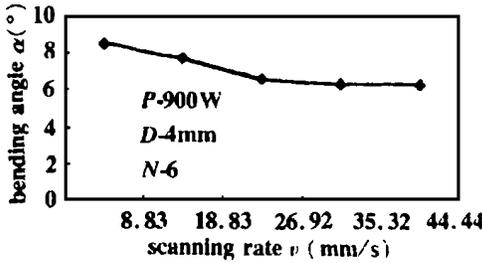


Fig. 6 Effect of scanning rate on the bending of thin plate

图 5 为薄板诱发热应力成形角度随激光功率变化的关系,诱发热应力成形角度先是随着激光功率增大而增大,然后,当激光功率达到 900W 左右时,诱发热应力成形角度达到最大值。随后,诱发热应力成形角度随着激光功率的增大而减小。

2. 3 扫描速度与诱发热应力成形角的关系

图 6 为诱发热应力成形角度随扫描速度变

化的关系:诱发热应力成形角度随着扫描速度的增大而减小。

2. 4 板长和板厚对诱发热应力成形角的影响

图 7 为板长和板厚对诱发热应力成形角度的影响关系:板料长度对诱发热应力成形角度的影响不显著。不过,试验中发现:当板长太小时,板料将发生失稳现象。这是由于板料上的残余压应力大于板料的临界失稳应力所致。此外,根据图示可知,在同样的参数下,薄板的诱发热应力成形角度大于厚板的诱发热应力成形角度。

2. 5 激光光束直径对诱发热应力成形角的影响

图 8 为诱发热应力成形角度随激光光束直径变化的关系:诱发热应力成形角度随光束直径的增大而增大,但是,当光束直径大到一定程度后,诱发热应力成形角度反而下降。

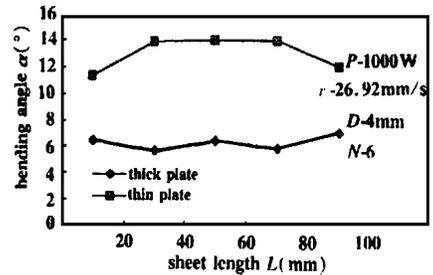


Fig. 7 Effect of sheet thickness and length on the bending angle

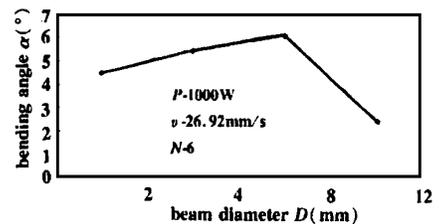


Fig. 8 Effect of the beam diameter on the bending angle

3 讨论与分析

在本试验参数条件下,钢板上下表面构成温差(图 4),使得上下表面的金属产生的热膨胀量不一致。由于加热区周围冷金属的限制,以至

产生的塑性压缩沿厚度方向分布不均匀。钢板正面受到的塑性压缩比反面要大。因此,在冷却后收缩而形成诱发热应力成形。由图 4 可见,在激光开始照射到测量点时,钢板有一反弯(诱发热应力成形方向背离激光源)后迅速变为正弯,正弯角度线性增加后达到一稳定状态。这可由图 9 来解释,钢板在移动激光热源的作用下,存在一等温区域(如低碳结构钢 $\geq 600^\circ\text{C}$),由于高温屈服极限的降低,材料处于几乎无应力状态,但该区域受到剧烈的塑性压缩,该区域由图中椭圆表示。图 9 中虚线表示的抛物线为局部最高温度,虚线前的局部区域温度升高,虚线后的局部区域温度下降。在温度升高的过程中,金属膨胀使得钢板产生反弯,同时产生压缩塑性变形,形成压缩塑性区。虚线后部的金属因冷却而产生收缩,在收缩力的作用下,形成正弯。在加热线能量一定的情况下,正弯角的大小,受到屈服应力的限制。因此,诱发热应力成形角达到一定值后趋于稳定。图 9 中用应力 σ 、应变 ε 表示了不同区域受到的塑性压缩和塑性拉伸的变化,也反映了不同区域的诱发热应力成形角的变化规律。

由此可见,在温差机理的作用下,一次激光扫描形成弯曲角的大小是与形成的塑性压缩区域的大小成正比的。加热时,产生的塑性压缩区域越大,弯曲角就越大。而压缩塑性区的大小是与加热的线能量(P/vD)成正比的。在激光功率不是太大的情况下,随着功率 P 的增大,线能量密度增大,此时在板厚方向产生的温度梯度越强烈,成形的动力——由非均匀温度场诱发出的热应力增大(图 4)。所以,板料的弯曲角度增大。但是,当激光功率达到一定值时,线能量密度(P/vD)增大使板料上表面温度提高的同时,板料下表面的温度也提高得较快。这实际上使得板料厚度方向的温度梯度减小,因此诱发出的热应力减小,导致诱发热应力成形角度减小(图 5)。图 4~图 5 还表明:多次扫描时,后续扫描所得的诱发热应力成形角度比前次扫描所得的诱发热应力成形角度小。这是由于后续加热过程中产生的压缩应力和前次扫描产生的拉伸残余应力相互叠加,致使总的压缩应力减小,相应的压缩应变也减小,从而使诱发热应力成形角度减小。

扫描速度的增大使线能量密度减小,使得板料厚度方向的温度梯度减小,因此,诱发出的热应力减小,导致诱发热应力成形角度减小(图 6)。

根据图 7 可知,在同样的参数下,薄板的诱发热应力成形角度大于厚板的诱发热应力成形角度。板料越厚,截面模量越大,刚性也越大。因而诱发热应力成形变形的抗力也越大,塑性诱发热应力成形变形量减小,从而使得诱发热应力成形角度减小。

当光束直径小于塑性区尺寸时,虽然光束直径增大将使线能量密度减小;但是,因为加热区的增大使得用于发生塑性变形区域增加。因此,在这种情况下诱发热应力成形角度将会随光束直径的增大而增大。一旦光束直径大于塑性区之后,随着光斑直径的进一步增大,线能量密度减小的趋势将占主导地位,使得板厚料度方向的温度梯度减小,故诱发出的热应力减小,导致诱发热应力成形角度减小。

总之,利用温度梯度机理成形时,加热形成的压缩塑变区的大小直接影响弯曲角的大小,而压缩塑变区的大小与线能量成正比。

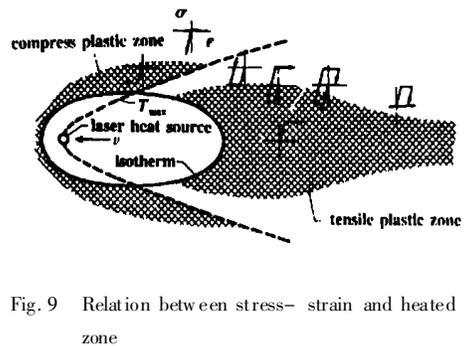


Fig. 9 Relation between stress-strain and heated zone

4 结 论

对低碳钢板料激光诱发热应力成形规律进行了研究。研究分析结果表明:激光诱发热应力成形角度与扫描次数成近似线性关系,随着扫描次数的增加诱发热应力成形角度增大;在其它参数不变的前提下,增大激光功率或减小扫描速度,可增加板料诱发热应力成形角度;板料厚度越小,板料的诱发热应力成形角度越大;一次扫描所产生的变形量不大,多次重复扫描可以得到较大的变形量;试验表明,后续扫描所得的诱发热应力成形角度比前次扫描所得的诱发热应力成形角度小。激光加热线能量是决定弯曲成形角的大小的,控制线能量就可以精确控制成角。

参 考 文 献

- 1 Arnet H, Vollertsen F. J Engng Manuf, 1995; 209: 433~ 442
- 2 Magee J, Watkins K G, Steen W M. J Laser Appl, 1998; 10(6): 235~ 246
- 3 Geiger M, Vollertsen F. CIRP Ann, 1993; 42: 301~ 304
- 4 Scully K. J Ship Prod, 1987; 3: 237~ 246
- 5 Vollertsen F. Lasers Engng, 1994; 2: 261~ 276
- 6 刘顺洪,周龙早,李志远. 中国机械工程, 2000; 增刊: 23~ 29

* * *

作者简介:刘顺洪,男,1954年8月出生。工学硕士,副教授。主要从事焊接力学行为、激光加工等科研与教学工作。

收稿日期:2000-06-25

• 简 讯 •

第十五届全国激光学术会议消息

中国光学学会、中国电子学会、中国物理学会、中国兵工学会、中国仪器仪表学会、华中科技大学激光技术国家重点实验室、武汉·中国光谷建设领导小组办公室、湖北省激光学会、湖北省电子学会将于2001年9月21日~24日在武汉·中国光谷科技会展中心和华中科技大学学术交流中心联合举办第十五届全国激光学术会议(9月20日报到)。

第十五届全国激光学术会议是新世纪的第一次盛会,将总结汇报二十世纪我国激光与光电子领域的最新成果,展望二十一世纪激光与光电子领域的发展方向,为我国激光与光电子新老学者提供探讨新思想、交流新技术的讲台,促进本领域的科技创新和成果转化。本次会议受到全国激光与光电子学术界的广泛重视和支持,来稿总数近400篇,会议规模约260人,并且安排了包括9名院士在内的15名著名专家到会作邀请报告。

本次会议将与国家科技部、中国工程院、国家外专局和湖北省人民政府、武汉市人民政府共同主办的武汉·中国光谷系列会议“中国高新技术产业与资本市场国际论坛”、“第二届中国武汉国际机电产品博览会”、“武汉·中国光谷国际人才交流暨技术交易洽谈会”、“国家高新技术开发区所在城市市长座谈会”同期举行。欢迎国内同行踊跃参加!同时欢迎各公司、企事业单位刊登广告、到会展示科技成果和发布信息。

有关会议的详细情况,请读者浏览华中科技大学激光技术国家重点实验室网站:<http://www.laserlab.hust.edu.cn>;大会秘书处联系人:许德胜,电话和传真:027-87543755,87541779;E-mail:lsklab@hust.edu.cn

第十五届全国激光学术会议节目委员会